

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ГЕОМЕТРИЮ СВАРНОГО ШВА ПРИ СВАРКЕ СПЛАВА АМГ7

студ. Доминикевич В.В., мл.н.с. Лапковский А.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. В современном машиностроении и авиастроении одной из ключевых задач является снижение инерционных нагрузок в деталях машин. Основным путем достижения этой задачи является снижение массы движущихся компонентов, что привело к росту применения алюминия и его сплавов.

Большинство деталей из алюминиевых сплавов получают литьем, в частности, из литейного сплава АМГ7. Однако, ряд конструктивных элементов, не может быть выполнен литейными технологиями, что ведет к необходимости применения сварки в таких изделиях.

Одним из способов получения бездефектных сварных соединений является лазерная сварка. Это связано с тем, что лазерная сварка имеет ряд преимуществ перед традиционными видами сварки: высокая производительность; локальность воздействия, минимальный нагрев деталей и деформации; низкая трудоемкость; возможность сварки разнородных материалов; высокое качество сварных соединений; возможность сварки в труднодоступных местах и разных пространственных положениях; возможность сварки без изменения режима комбинированных изделий, с переменной толщиной; гибкость процесса, возможность быстрой автоматической программируемой и дистанционной перенастройки и переналадки на другие режимы, или технологические процессы; экономия электроэнергии и присадочных материалов.

В настоящей работе рассмотрено влияния основных технологических параметров процесса лазерной сварки (скорости V , мощности P и положения фокуса ΔF) на глубину и ширину сварного шва методом полного факторного эксперимента.

Применяемые методики и оборудование. Экспериментальная часть работы выполнялась на оптоволоконном лазере IPG YLR-1000 (максимальная мощность $P_{\text{макс}}=1000\text{Вт}$, длина волны излучения $\lambda=1,06\text{мкм}$, фокусное расстояние линзы $F=150\text{мм}$). Сварка проводилась встык на образцах сплава АМГ7 размерами $100 \times 40 \times 4\text{мм}$ в среде защитного газа (аргон). Исследование геометрии шва производилась путем подготовки микрошлифов и исследование на оптическом микроскопе MICRO-200.

Число всех опытов при полно факторном эксперименте будет равно $n = 2^k$, где k – количество изучаемых факторов. Постановка опытов по такому плану называется полным факторным экспериментом типа 2^k (ПФЭ 2^k) [1].

Так как матрица планирования ПФЭ 2^k должна удовлетворять определенным требованиям (такие матрицы с заданными требованиями уже построены, см. [1,4]), то формулы, определяющие коэффициенты уравнения регрессии, достаточно просты:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j,$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j, i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

$$b_{r,p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} \cdot x_{jp} \bar{y}_j, r < p, r = \overline{1, k}, p = \overline{1, k}.$$

Остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2$ вычисляется следующим образом:

$$S_{\text{ост.}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (2)$$

где n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

\tilde{y}_j -значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -ого эксперимента;

\bar{y}_j -среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента.

Расчётное значение критерия Фишера $F_{\text{расч.}}$ определяют по формуле:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ост.}}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (3)$$

где $S_{\{y\}}^2$ -дисперсия воспроизводимости, найденная по формуле (4),

$S_{\text{ост.}}^2$ - остаточная дисперсия (или дисперсия адекватности).

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (4)$$

где n – число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);

m – число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте;

y_{ji} – результат отдельного i -го наблюдения в j -ом эксперименте;

\bar{y}_j -среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента, находится по формуле 5.

Если обозначить за y_{ji} значение результата, полученного в i -том опыте ($i=1, \dots, m$) для j -того эксперимента ($j=1, \dots, n$), то выборочное среднее для каждого эксперимента вычисляют по известной формуле [2,3]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Решение и анализ результатов. Для исследования влияния параметров лазерной сварки на геометрию сварного шва при сварки сплава АМг7 были поставлены эксперименты по плану ПФЭ 2^3 , причем каждый эксперимент повторялся по три раза (таблицу 1). В качестве факторов выбираем, среднюю глубину y_1 и среднюю ширину y_2 сварного шва, были выбраны следующие:

x_1 – скорость (мм / мин) $x_1^- = 180$, $x_1^+ = 1800$

x_2 – мощность (кВт), $x_2^- = 0,5$, $x_2^+ = 1$,

x_3 – положение фокуса, $x_3^- = -1$, $x_3^+ = 0$.

Требуется построить уравнение регрессии, учитывая взаимодействия факторов, проверить полученную модель на адекватность и произвести её интерпретацию.

Табл. 1. Исходная матрица планирования ПФЭ 2^3

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты опытов	
	z_1	z_2	z_3	y_1	y_2
1	+	+	+	2,3	1,9
2	-	+	+	4,1	3,76
3	+	-	+	0,6	2,1
4	-	-	+	1,5	0,5
5	+	+	-	2,4	1,7
6	-	+	-	4,1	0,5
7	+	-	-	0,6	2
8	-	-	-	1,4	0,5

Табл. 2. Матрица планирования с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов	
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2
1	+	+	+	+	+	+	+	2,3	1,9
2	-	+	+	-	-	+	-	4,1	3,76
3	+	-	+	-	+	-	-	0,6	2,1
4	-	-	+	+	-	-	+	1,5	0,5
5	+	+	-	+	-	-	-	2,4	1,7
6	-	+	-	-	+	-	+	4,1	0,5
7	+	-	-	-	-	+	+	0,6	2
8	-	-	-	+	+	+	-	1,4	0,5

Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии по формулам (1):

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 y_1 = \frac{1}{8} (2,3 + 4,1 + 0,6 + 1,5 + 2,4 + 4,1 + 0,6 + 1,4) = \frac{17}{8} = 2,125 \approx 2,13;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 - 4,1 + 0,6 - 1,5 + 2,4 - 4,1 + 0,6 - 1,4) = -\frac{5,2}{8} = -0,65;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 + 4,1 - 0,6 - 1,5 + 2,4 + 4,1 - 0,6 - 1,4) = \frac{8,8}{8} = 1,1;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j3} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 + 4,1 + 0,6 + 1,5 - 2,4 - 4,1 - 0,6 - 1,4) = -\frac{0,3}{8} \approx 0,04;$$

$$b_{1,2} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 - 4,1 - 0,6 + 1,5 + 2,4 - 4,1 - 0,6 + 1,4) = -\frac{1,8}{8} \approx -0,23;$$

$$b_{1,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j3} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 - 4,1 + 0,6 - 1,5 - 2,4 + 4,1 - 0,6 + 1,4) = -\frac{0,2}{8} \approx -0,03;$$

$$b_{2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} x_{j3} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 + 4,1 - 0,6 - 1,5 - 2,4 - 4,1 + 0,6 + 1,4) = -\frac{0,2}{8} \approx -0,03;$$

$$b_{1,2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} x_{j3} y_1 = \frac{1}{8} (2,3 - 4,1 - 0,6 + 1,5 - 2,4 + 4,1 + 0,6 - 1,4) = \frac{0}{8} = 0;$$

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 y_2 = \frac{1}{8} (1,9 + 3,76 + 2,1 + 0,5 + 1,7 + 0,5 + 2 + 0,5) = \frac{12,96}{8} = 1,62;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} y_2 = \frac{1}{8} (1,9 - 3,76 + 2,1 - 0,5 + 1,7 - 0,5 + 2 - 0,5) = \frac{2,44}{8} \approx 0,31;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} y_2 = \frac{1}{8} (1,9 + 3,76 - 2,1 - 0,5 + 1,7 + 0,5 - 2 - 0,5) = \frac{2,76}{8} \approx 0,35;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j3} y_2 = \frac{1}{8} (1,9 + 3,76 + 2,1 + 0,5 - 1,7 - 0,5 - 2 - 0,5) = \frac{3,56}{8} \approx 0,45;$$

$$b_{1,2} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} y_2 = \frac{1}{8} (1,9 - 3,76 - 2,1 + 0,5 + 1,7 - 0,5 - 2 + 0,5) = -\frac{3,76}{8} = -0,47;$$

$$b_{1,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j3} y_{j2} = \frac{1}{8} (1,9 - 3,76 + 2,1 - 0,5 - 1,7 + 0,5 - 2 + 0,5) = -\frac{2,96}{8} = -0,37;$$

$$b_{2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} x_{j3} y_{j2} = \frac{1}{8} (1,9 + 3,76 - 2,1 - 0,5 - 1,7 - 0,5 + 2 + 0,5) = \frac{3,36}{8} = 0,42;$$

$$b_{1,2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} x_{j3} y_{j2} = \frac{1}{8} (1,9 - 3,76 - 2,1 + 0,5 - 1,7 + 0,5 + 2 - 0,5) = -\frac{3,16}{8} \approx -0,4;$$

Составляем для наглядности таблицу 3, в которую заносим найденные коэффициенты уравнения регрессии.

Табл. 3. Коэффициенты уравнения регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_3	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$
y_1	2,13	-0,65	1,1	0,04	-0,23	-0,03	-0,03	0
y_2	1,62	0,31	0,35	0,45	-0,47	-0,37	0,42	-0,4

Получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y_1 = 2,13 - 0,65x_1 + 1,1x_2 + 0,04x_3 - 0,23x_{1,2} - 0,03x_{1,3} - 0,03x_{2,3}; \quad (6)$$

$$y_2 = 1,62 + 0,31x_1 + 0,35x_2 + 0,45x_3 - 0,47x_{1,2} - 0,37x_{1,3} + 0,42x_{2,3} - 0,4x_{1,2,3};$$

Проверим полученное уравнение (2) на адекватность по критерию Фишера.

Находим дисперсию воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$.

Табл. 4. Расчёт выборочных дисперсий

	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_1	$(y_{j1} - \bar{y}_1)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_1)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_1)^2$	S_1^2
1	2,4	2,1	2,3	2,3	0,01	0,04	0	0,025
2	3,9	4	4,3	4,1	0,04	0,01	0,04	0,045
3	0,6	0,5	0,7	0,6	0	0,01	0,01	0,01
4	1,5	1,7	1,3	1,5	0	0,04	0,04	0,04
5	2,4	2,6	2,2	2,4	0	0,04	0,04	0,04
6	3,7	4,1	4,5	4,1	0,16	0	0,16	0,16
7	0,7	0,5	0,6	0,6	0,01	0,01	0	0,01
8	1,3	1,5	1,4	1,4	0,01	0,01	0	0,01

Табл. 4.1. Расчёт выборочных дисперсий

	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_2	$(y_{j1} - \bar{y}_2)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_2)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_2)^2$	S_2^2
1	1,8	1,9	2	1,9	0,01	0	0,01	0,01
2	3,4	4	3,88	3,76	0,1296	0,0576	0,0144	0,1008
3	2	2	2,3	2,1	0,01	0,01	0,04	0,03
4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,01	0	0,01	0,01
5	1,6	1,8	1,7	1,7	0,01	0,01	0	0,01
6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,01	0,01	0	0,01
7	2,1	1,8	2,1	2	0,01	0,04	0,01	0,03
8	0,6	0,4	0,5	0,5	0,01	0,01	0	0,01

Суммируем элементы последнего столбца таблицы 4 и 4.1, получаем:

$$\sum_{j=1}^8 S_1^2 = 0,34;$$

$$\sum_{j=1}^8 S_2^2 = 0,2108;$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

$$S_{\{y_1\}}^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 S_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,34 = 0,0425 \approx 0,04;$$

$$S_{\{y_2\}}^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 S_2^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,2108 = 0,02635 \approx 0,03;$$

Так как дисперсия воспроизводимости найдена, то для определения расчётного значения критерия Фишера $F_{\text{расч.}}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S_{\text{ост.}}^2$. Для этого найдём значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии $\tilde{y}_j (j=1, \dots, 8)$, подставляя +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента из таблицы 2 (для y_1):

$$\tilde{y}_1 = 2,13 - 0,65 + 1,1 + 0,04 - 0,23 - 0,03 - 0,03 = 2,33;$$

$$\tilde{y}_2 = 2,13 - 0,65(-1) + 1,1 + 0,04 - 0,23(-1) - 0,03(-1) - 0,03 = 4,15;$$

$$\tilde{y}_3 = 2,13 - 0,65 + 1,1(-1) + 0,04 - 0,23(-1) - 0,03 - 0,03(-1) = 0,65;$$

$$\tilde{y}_4 = 2,13 - 0,65(-1) + 1,1(-1) + 0,04 - 0,23 - 0,03(-1) - 0,03(-1) = 1,55;$$

$$\tilde{y}_5 = 2,13 - 0,65 + 1,1 + 0,04(-1) - 0,23 - 0,03(-1) - 0,03(-1) = 2,37;$$

$$\tilde{y}_6 = 2,13 - 0,65(-1) + 1,1 + 0,04(-1) - 0,23(-1) - 0,03 - 0,03(-1) = 4,07;$$

$$\tilde{y}_7 = 2,13 - 0,65 + 1,1(-1) + 0,04(-1) - 0,23(-1) - 0,03(-1) - 0,03 = 0,57;$$

$$\tilde{y}_8 = 2,13 - 0,65(-1) + 1,1(-1) + 0,04(-1) - 0,23 - 0,03 - 0,03 = 1,35;$$

(Для y_2):

$$\tilde{y}_1 = 1,62 + 0,31 + 0,35 + 0,45 - 0,47 - 0,37 + 0,42 - 0,4 = 1,91;$$

$$\tilde{y}_2 = 1,62 + 0,31(-1) + 0,35 + 0,45 - 0,47(-1) - 0,37(-1) + 0,42 - 0,4(-1) = 3,77;$$

$$\tilde{y}_3 = 1,62 + 0,31 + 0,35(-1) + 0,45 - 0,47(-1) - 0,37 + 0,42(-1) - 0,4(-1) = 2,11;$$

$$\tilde{y}_4 = 1,62 + 0,31(-1) + 0,35(-1) + 0,45 - 0,47 - 0,37(-1) + 0,42(-1) - 0,4 = 0,49;$$

$$\tilde{y}_5 = 1,62 + 0,31 + 0,35 + 0,45(-1) - 0,47 - 0,37(-1) + 0,42(-1) - 0,4(-1) = 1,71;$$

$$\tilde{y}_6 = 1,62 + 0,31(-1) + 0,35 + 0,45(-1) - 0,47(-1) - 0,37 + 0,42(-1) - 0,4 = 0,49;$$

$$\tilde{y}_7 = 1,62 + 0,31 + 0,35(-1) + 0,45(-1) - 0,47(-1) - 0,37(-1) + 0,42 - 0,4 = 1,99;$$

$$\tilde{y}_8 = 1,62 + 0,31(-1) + 0,35(-1) + 0,45(-1) - 0,47 - 0,37 + 0,42 - 0,4(-1) = 0,49;$$

Остаточную дисперсию $S_{\text{ост.}}^2$ для y_1 вычисляем по формуле (2):

$$S_{\text{ост.}}^2 = 3 \cdot [(2,33 - 2,3)^2 + (4,15 - 4,1)^2 + (0,65 - 0,6)^2 + (1,55 - 1,5)^2 + (2,37 - 2,4)^2 + (4,07 - 4,1)^2 + (0,57 - 0,6)^2 + (1,35 - 1,4)^2] = 0,0408;$$

Остаточная дисперсия $S_{\text{ост.}}^2$ для y_2 :

$$S_{\text{ост.}}^2 = 3 \cdot [(1,91 - 1,9)^2 + (3,77 - 3,76)^2 + (2,11 - 2,1)^2 + (0,49 - 0,5)^2 + (1,71 - 1,7)^2 + (0,49 - 0,5)^2 + (1,99 - 2)^2 + (0,49 - 0,5)^2] = 0,0024.$$

Расчётное значение критерия Фишера $F_{\text{расч.}}$ определяем по формуле (3):

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ост.}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{0,0408}{0,4} = 0,102 (\text{для } y_1);$$

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ост.}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{0,0024}{0,3} = 0,0008 (\text{для } y_2);$$

Табличное значение критерия $F_{\text{табл.}}$ находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответствующим степеням свободы $k_1 = n - r = 8 - 7 = 1$ и $k_2 = n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$:

$F_{\text{табл.}} = 4,49$.

Так как $F_{\text{расч.}} = 0,102$ и $0,0008 < F_{\text{табл.}} = 4,49$, то уравнение регрессии (6) адекватно.

Вывод по ширине сварного шва. Проведём интерпретацию полученной модели для (y_2 -ширина сварного шва):

$$y_2 = 1,62 + 0,31x_1 + 0,35x_2 + 0,45x_3 - 0,47x_{1,2} - 0,37x_{1,3} + 0,42x_{2,3} - 0,4x_{1,2,3};$$

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает взаимодействие факторов x_1x_2 – сочетание скорости и мощности.

После сочетания двух факторов по силе влияния на отклик (ширину сварного шва) идут: x_3 – положение фокуса, взаимодействие факторов x_2x_3 – сочетание мощности и положения фокуса, взаимодействие факторов $x_1x_2x_3$ – сочетание скорости, мощности и положения фокуса, взаимодействие факторов x_1x_3 – сочетание скорости и положения фокуса, фактор x_2 – мощность.

Так как коэффициенты x_1, x_2, x_3, x_2x_3 положительны, то с увеличением этих факторов увеличивается отклик, т.е. увеличивается ширина сварного шва.

Коэффициенты при $x_1x_2, x_1x_3, x_1x_2x_3$ отрицательны, это означает, что с уменьшением перечисленных взаимодействий факторов значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

РЕЗЮМЕ

В работе рассмотрено влияния основных технологических параметров процесса лазерной сварки (скорости V , мощности P и положения фокуса ΔF) на глубину и ширину сварного шва методом полного факторного эксперимента. Экспериментальная часть работы выполнялась на оптоволоконном лазере IPG YLR-1000.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 282 с.
2. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 10-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
3. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие / В.Е. Гмурман. – 8-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2003. – 405 с.
4. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

SUMMARY

The influence of the main technological parameters of laser welding (velocity V , power P and the focus position ΔF) on the depth and width of the weld by the full factorial experiment is discussed in the article. The experimental part of the work was done using on the fiber-optic laser IPG YLR- 1000.

E-mail: viconlinez@gmail.com
alapkovskii@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2015